مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال چهاردهم، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۵، شمارهٔ پیاپی ۲۷

DOI: 10.22067/geography.v14i2.54607

بررسی کاربرد GIS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ قلعه‌چای)

احمد انصاری لاری (استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران)
ansari_ul@yahoo.com
مریم انصاری (دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، نویسندهٔ مسئول)
ansarimaryam149@gmail.com

صص ۱۷۳ ـ ۱۵۵

چکیده

اهداف: در این پژوهش به بررسی میزان فرسایش خاک و بار رسوب حوضهٔ آبریز قلعه‌چای با استفاده از مدل تجربی RUSLE در محیط (GIS) پرداخته شده است.
روش: برای دست‌یافتن به هدف تحقیق، از مدل تجربی RUSLE در محیط GIS که شامل عامل فرسایندگی باران، عامل فرسایش‌پذیری خاک، عامل توپوگرافی و پوشش گیاهی است، استفاده شد و اسناد و مدارک مختلفی، ازجمله نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، آمارهای مختلف مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی و مدل ارتفاعی رقومی به‌عنوان ابزار تحقیق مورداستفاده قرار گرفت.
یافته‌ها/ نتایج: نتایج و رسوب کلّ برآورد شده در روش USDA، قابلیت تلفیق مدل RUSLE و GIS را در برآورد میزان فرسایش و بارِ رسوب نشان می‌دهد.
نتیجه‌گیری: بررسی نقشهٔ خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح دشت، از صفر تا ۲/۲۲۵ برحسب تن در هکتار در سال متغیّر است و منطقهٔ موردمطالعه، جزو طبقهٔ فرسایشی خیلی کم تا کم قرار داشت و حداکثر بار رسوب ۰/٦٤ تن در هکتار در سال برآورد شد.
کلیدواژه‌ها: فرسایش خاک، مدل RUSLE، حوضهٔ آب‌ریز قلعه‌چای، سیستم اطّلاعات جغرافیایی

تاریخ دریافت: ۱۳۹٤/۱۲/۲۵   تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۱۱

۱. مقدّمه

امروزه کمتر منطقه‌ای را در سطح زمین می‌توان یافت که در معرض تخریب و فرسایش قرار نگرفته باشد و البته عامل اصلی آن، افزایش جمعیت و استفادهٔ بیش از حد از زمین است (احمدی، ۱۳۸۸، ص.۱۹۵). شدّت فرسایش و وسعت آن در زمان‌ها و مکان‌های مختلف یکسان نبوده است و به شرایط طبیعیِ پستی و بلندی، خصوصیات خاک‌ها و چگونگی کاربری زمین مربوط می‌شود(شکوری، ۱۳۷٤، ص.٥٦). پدیدهٔ فرسایش خاک و تولید رسوب برای جامعهٔ بشری مشکلات زیادی را به‌وجود آورده؛ به‌طوری‌که امروز فرسایش خاک یکی از جدّی‌ترین مشکلات کشورهای درحال‌توسعه و بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته است. برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی فرسایشِ ناشی از اعمال مدیریت نادرست در استفاده از اراضی، نیاز به اتّخاذ تدابیری در مقیاس‌های مزرعه و حوضهٔ آبخیز است. اگرچه متوقّف‌کردن فرسایش زمین‌شناسی امکان‌پذیر نیست، ولی پیشگیری و مهار فرسایش خاک در گسترهٔ حوضه‌های آبخیز و در چهارچوب طرح‌های بهره‌برداری از آب و خاک و آبخیزداری یک نیاز اساسی است. بهینه‌سازی مدیریت خاک و بهره‌برداری از این منبع در گسترهٔ حوضه‌ها یکی از راه‌های مناسب در تحقّق حفاظت از خاک است (خیّام، غنمی جابر، و صمدزاده، ۱۳۹۲، ص. ۲). حوضهٔ آبریز قلعه‌چای به‌دلیل پوشیده‌شدن با آبرفت‌های رودخانهٔ قلعه‌چای، خاک مناسب و آب نسبتاً کافی و شرایط زیست‌محیطی مناسب باعث جایگزینی مراکز انسانی متعدّد گردیده که بررسی وضعیت فرسایش را در این منطقه، اجتناب‌ناپذیر ساخته است و تهیهٔ نقشهٔ شدّت فرسایش امری ضروری به‌نظر می‌رسد. بنابراین هدف این پژوهش، مدل‌سازی میزان فرسایش خاک و بار رسوب حوضهٔ آبریز قلعه‌چای از طریق مدل RUSLE با استفاده از سامانهٔ اطّلاعات جغرافیایی[1] و همچنین شناسایی مناطق حسّاس به فرسایش جهت اجرای عملیات حفاظتی آب و خاک است.

۲. پیشینهٔ تحقیق

به‌دلیل اینکه سیستم اطّلاعات جغرافیایی و سنجش از دور[2] امکان تجزیه‌وتحلیل داده‌های مکانی را فراهم می‌آورد(آرخی و نیازی، ۱۳۸۹، ص.۳)، مطالعات گسترده‌ای در جهان و ایران

1. Geographic Information System(GIS)
2. Remote Sensing (RS)

درخصوص مدل RUSLE در محیط GIS صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، می‌توان به پژوهش‌های: تیواری ریس و نیرینگ[1] (۲۰۰۰) در ۲۰ نقطه در ایالات متّحدهٔ آمریکا، وانگ آندرسون[2] (۲۰۰۳) در یک حوضهٔ استوایی از رشته‌کوه‌های آند در کلمبیا، مارکر[3] (۲۰۰۶) جنوب توسکانی در ایتالیا، بونیلا، ریس، و مگری[4] (۲۰۱۰) در شیلی مرکزی، فرهان، دالال، و فرهان[5] (۲۰۱۳) در حوضهٔ کوفرانجا در شمال اردن، کاروالیو، دوریگن، آنتونز، آلمیدیا، و اولیویرا[6] (۲۰۱٤) در حوضه‌ای در جنوب برزیل، آرخی و نیازی (۱۳۸۹) در حوضهٔ بالادست سدّ ایلام، واعظی، بهرامی، صادقی، و مهدیان (۱۳۸۹) شمال شهرستان هشترود در استان آذربایجان شرقی، زندی، سلیمانی، حبیب‌نژاد، و روشن (۱۳۹۲) حوضهٔ وازرود در استان مازندران، رحیمی و مزبانی (۱۳۹۲) حوضهٔ آبریز سیوند، رضائی، فریدی، قربانی، و کاظمی(۱۳۹۳) حوضهٔ آبریز گابریک در جنوب خاوری استان هرمزگان، رخبین، نوحه‌گر، کمالی، و حبیب‌اللهیان (۱۳۹۳) حوضهٔ لاورفین استان هرمزگان و... اشاره کرد.

در حوضهٔ آبریز قلعه‌چای، روستایی، رسولی، و احمدزاده (۱۳۸۹) با استفاده از مدل تجربی MPSIAC و تکنیک‌های سنجش از دور و GIS در بالادست سدّ قلعه‌چای با مساحتی در حدود ۲٤۹/۵ کیلومتر مربّع فرسایش و رسوب حوضهٔ آبریز را محاسبه کردند که نتایج نشان می‌دهد سالانه در حدود ۱۳۳۰۱٦ تُن در سال، از خاک حوضه فرسایش می‌یابد.

۳. روش‌شناسی تحقیق

۳. ۱. روش تحقیق

در این روش پژوهش، از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ هرگلان برگ شمارهٔ **III** ۵۲٦۵، شیرامین برگ شمارهٔ **II** ۵۱٦۵، مراغه برگ شمارهٔ **IV** ۵۲٦٤ و عجب‌شیر برگ شمارهٔ **I** ۵۱٦٤ جهت انجام تحلیل‌های توپوگرافی، بررسی شیب دامنه‌ها و شبکهٔ هیدروگرافی، سطوح ارتفاعی و تحلیل‌های کمّی و از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ برگ‌های آذرشهر، اسکو، عجب‌شیر و مراغه برای چینه‌شناسی، لیتولوژی، ماهیت مواد، ساختمان زمین‌شناسی، مراحل تکوین و نیز از

1. Tiwari, Riss, Nearing
2. Wang, Gertner, Fang, & Anderson
3. Marker
4. Bonilla, Reyes, Magri
5. Farhan, Dalal, Farhan
6. Carvalho, Durigon, Antunes, Almeida, Oliveira

آمار ۱۱ سال بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی اطراف محدودهٔ حوضه، تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزار ARC GIS 10.2 و مدل فرسایش خاک RUSLE برای برآورد میزان هدررفت خاک استفاده شد.

مدل RUSLE یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با شش عامل زیر رابطه دارد (ویشمایر و اسمیت[1]، ۱۹۷۸، ص. ٤):

رابطهٔ ۱) $$A=R.K.L.S.C.P$$

A: میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار)، R: عامل فرسایندگی باران ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$)، K: عامل فرسایش‌پذیری خاک ($Mg\ ha\ h\ ha^{-1}\ Mj^{-1}\ mm^{-1}$)، L: عامل طول شیب؛ S: عامل درجهٔ شیب، **C:** عامل پوشش گیاهی و **P:** عامل اقدامات حفاظتی است. مقادیر **C**، S، L **و** P بدون واحد هستند.

۳. ۱. ۱. عامل فرسایندگی باران (R)

این عامل بیانگر فاکتور فرسایش‌دهندگی باران یا معیار فرسایش برای مدّت بارندگی موردنظر است و قدرت فرسایش یک باران مشخّص را تعیین می‌کند که این شاخص (**EI_{30}**) از ترکیب انرژی جنبشی باران (**E**) و بیشترین شدّت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای منطقه (**I_{30}**) به‌دست می‌آید(صالحی، اسفندیارپور بروجنی، مهاجر، و باقری بداغ‌آبادی، ۱۳۹٤، ص. ٤٦). برای مناطقی که جزئیات داده‌های اقلیمی وجود ندارد، **R** را می‌توان با استفاده از اصلاح‌شدهٔ شاخص فورنیر تخمین زد(هوی، یولینگ، یانگ، و ساگونگ[2]، ۲۰۱۰، ص. ۹٤٤). رابطهٔ شاخص فورنیر **F** به‌صورت زیر (رابطهٔ ۲) است.

رابطهٔ ۲) $$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} Pi^2}{\sum_{i=1}^{12} P}$$

در اینجا **Pi** متوسّط بارندگی ماهانه (میلی‌متر) و **P** متوسّط بارندگی سالیانه (میلی‌متر) است. سپس با جای‌گذاری شاخص فورنیر در روابط زیر(رابطهٔ ۳ و ٤) که توسّط رنارد و فریموند (۱۹۹٤) برای مناطق فاقد داده‌های تفصیلی رگبار (شدّت بارندگی) پیشنهاد شده است، مقدار فاکتور **R** برای ایستگاه ها برآورد می‌شود.

رابطهٔ ۳) $$R\text{-}Factor = (0.07397 \times F^{1.847})/17.2 \qquad F<55\ mm$$

رابطهٔ ٤) $$R - Factor = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times F^{2})/17.2 \qquad F\geq 55mm$$

1. Wischmeier, Smith
2. Hui, Xiaoling, Kyoung, Sagong

۳. ۱. ۲. عامل حفاظت خاک (P)

عامل مربوط به عملیات حفاظت خاک که در آن، میزان خاک فرسایش‌یافته از منطقه با کشت نواری و بر روی خطوط تراز یا تراس‌بندی شده به خاک ازدست‌رفته با کشت خطّی در جهت شیب (از بالا با پایین) است(صالحی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۹). چنانچه هیچ کار حفاظتی صورت نگرفته باشد، مقدار آن یک درنظر گرفته می‌شود. در بعضی مواقع در صورت نبود اطّلاعات کافی درمورد نحوهٔ مدیریت اراضی، از معادله حذف می‌شود.

۳. ۱. ۳. عامل فرسایش‌پذیری خاک(K)

عامل فرسایش‌پذیری در مدل **RUSLE** را می‌توان از طریق منحنی‌های مربوطه تعیین کرد. مورگان برای ضریب فرسایش‌پذیری (**K**) خاک‌های مختلف اعدادی را پیشنهاد کرده است که در جدول (۱) نشان داده شده است(احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۷).

جدول ۱ـ فرسایش‌پذیری خاک (K)

مأخذ: احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۰۷

وضعیت خاک	K	وضعیت خاک	K
خاک سطحی با پوشش سنگ‌ریزه‌ای	۰/۵	اراضی مقاوم به فرسایش	۰/۱
خاک‌های ماسه‌ای	۰/۱٦	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰/٤۲
خاک‌های لومی شنی	۰/۱۲	خاک‌های لومی با ماسهٔ بسیار ریز	۰/٤۲
خاک‌های سیلت لومی	۰/٤۸	خاک‌های لومی	۰/۳۷
خاک‌های سیلتی رسی	۰/۲۵	خاک‌های لومی رسی	۰/۳۷

۳. ۱. ٤. عامل طول شیب(L) و درجهٔ شیب (S)

فاکتورهای **L** و **S** در مدل **RUSLE**، بیانگر تأثیر توپوگرافی بر روی فرسایش خاک است. ثابت شده است که افزایش در طول شیب و درجهٔ شیب می‌تواند سرعت جریان آب را در سطح زمین افزایش دهد و باعث تشدید فرسایش خاک شود(هان، بارفیلد، هایس [1]، ۱۹۹٤، ص. ۲٤٦). به‌طورکلّی می‌توان هریک از عوامل طول شیب و درجهٔ شیب را با هم درنظر گرفت که آن را با علامت **LS** نشان می‌دهند(رحیمی و مزبانی، ۱۳۹۲، ص. ۸). برای به‌دست‌آوردن ضریب **LS** از فرمول زیر در محیط **Raster Calculator** استفاده می‌نماییم. در این فرمول، **S** درصد شیب زمین است که عامل درجهٔ

1. Haan, Barfield, Hayes

شیب(**S**) از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود(صالحی، اسفندیارپور بروجنی، مهاجر، و باقری بداغ‌آبادی، ۱۳۹٤، ص. ۵۸).

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{22.13}(0.065 + 0.045 * S + 0.0065 * S^2) \quad \text{رابطهٔ ۵}$$

که **L** طول شیب برحسب متر و **S** درجهٔ شیب زمین است(احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۱۰).

۳. ۱. ۵. عامل پوشش گیاهی(C)

عامل مربوط به عملیات زراعی و رسوبات تولیدشده در منطقه‌ای با پوشش گیاهی مشخّص نسبت به پلات استاندارد است. مورگان ضریب **c** را منحصر به پوشش گیاهی دانسته و مقدار آن در جدول (۲) بیان شده است (احمدی، ۱۳۸۸، ص.۵۱۰).

جدول ۲ـ تعیین ضریب c از روی پوشش گیاهی در معادلهٔ جهانی فرسایش خاک

مأخذ: احمدی، ۱۳۸۸، ص. ۵۱۰

وضعیت پوشش گیاهی	میزان	وضعیت پوشش گیاهی	میزان
خیلی خوب	۰/۰٤	فقیر	۰/۲۵
خوب	۰/۰۹	بسیار فقیر	۰/۳۳
نسبتاً خوب	۰/۱۵	فاقد پوشش گیاهی	۰/٤۵
نسبتاً فقیر	۰/۲۰	–	–

از طرفی، باید نسبت تحویل رسوب **SDR** برای منطقهٔ موردنظر جهت برآورد میزان رسوب انتقالی به خروجی‌های منطقه محاسبه گردد(لیم، مایونگ، انجل، تانگ، چوی، کیم[1]، ۲۰۰۵، ص. ٦۷). در این مطالعه از سه روش براساس مساحت **USDA 1975**، بویس ۱۹۷۵و وانونی ۱۹۷۵ استفاده شده است(رابطهٔ ٦، ۷، ۸).

رابطهٔ ٦) رابطهٔ USDA $SDR = 0.5656A^{-0.11}$

رابطهٔ ۷) رابطهٔ بویس $SDR = 0.4724A^{-0.125}$

رابطهٔ ۸) رابطهٔ وانونی $SDR = 0.3750A^{-0.2382}$

در سه معادلهٔ فوق، **A** مساحت حوضه به کیلومتر مربّع است.

1. Lim, Myung, Engel, Tang, Choi& Ki-Sung Kim

۳. ۲. منطقهٔ موردمطالعه

حوضهٔ قلعه‌چای یکی از زیرحوضه‌های دریاچهٔ ارومیه است که در شرق این دریاچه واقع شده است. این حوضه از شمال به حوضهٔ گنبرچای (آذرشهرچای)، از شرق و جنوب به حوضهٔ صوفی‌چای (مراغه) و چوان‌چای و از غرب به دریاچهٔ ارومیه محدود می‌شود. این حوضه با مساحتی بالغ بر ٤٧٤ کیلومتر مربّع در استان آذربایجان شرقی و در شمال‌غربی شهرستان عجب‌شیر قرار گرفته که از نظر موقعیت جغرافیایی بین "٣٦ ´٥٤ °٤٥ الی "٥٩ ´١٩ °٤٦ طول شرقی و "٥٠ ´٢٤ °٣٧ الی "٢٨ ´٤٢ °٣٧ عرض شمالی واقع شده است. حداکثر ارتفاع حوضهٔ کوه میدان‌داغ با ارتفاع ٣٤١٢ متر است که سرچشمهٔ حوضه در آن قرار دارد و حداقل ارتفاع آن ١٢٧٤ متر در کنار روستای خانیان و گل‌تپّه است (شکل ١).

مهم‌ترین رودخانهٔ جاری در سطح منطقه، رودخانهٔ قلعه‌چای است. سرشاخه‌های اصلی این رودخانه شامل قلعه‌چای، ینگجه، مهماندار، چهاربرود و آلمالو چای هستند که همگی از ارتفاعات سهند سرچشمه گرفته و در دوکیلومتری غرب آبادی صور به هم ملحق شده و رودخانهٔ قلعه‌چای را تشکیل می‌دهند. رودخانهٔ قلعه‌چای در اراضی مخروط‌افکنه‌ایِ خانیان و گل‌تپّه واقع در شمال عجب‌شیر وارد دشت شده و به سه شاخه تبدیل شده و درنهایت به دریاچهٔ ارومیه ملحق می‌گردد. منطقهٔ موردنظر از نظر توپوگرافی، دارای دو واحد کوهستان و دشت است که توسّط رودخانهٔ قلعه‌چای زهکشی می‌شود. از نظر زمین‌شناختی، منطقه دارای توالی چینه‌شناسی قابل‌توجّهی است و اغلب واحدهای چینه‌شناسی از قدیم به جدید در منطقه دیده می‌شود. بررسی توزیع جغرافیایی سنگ‌های برونزد یافته در منطقه مشخّص می‌کند که ٦٦ درصد آنها عمدتاً مربوط به سنگ‌های مقاوم و آتشفشانی و ١٤ درصد مربوط به سنگ‌های نیمه‌مقاوم هستند. ارتفاع متوسّط محدودهٔ موردمطالعه، ٢٠١٧ متر و شیب متوسّط آن در حدود ٢٥/٠٥ درصد است. دبی متوسّط دورهٔ آماری حوضه، برابر ٢/١٧ متر مکعب در ثانیه می‌باشد که متأثّر از اقلیم نیمه‌خشک کوهستانی محدودهٔ موردمطالعه است(روستایی، رسولی، و احمدزاده، ١٣٨٩، ص. ١٦٠).

در این پژوهش جهت تفکیک واحدهای هیدرولوژی حوضه با استفاده از DEM منطقه و اکستنشن Arc Hydro در محیط GIS، پنج واحد هیدرولوژی[1] برای حوضهٔ موردمطالعه

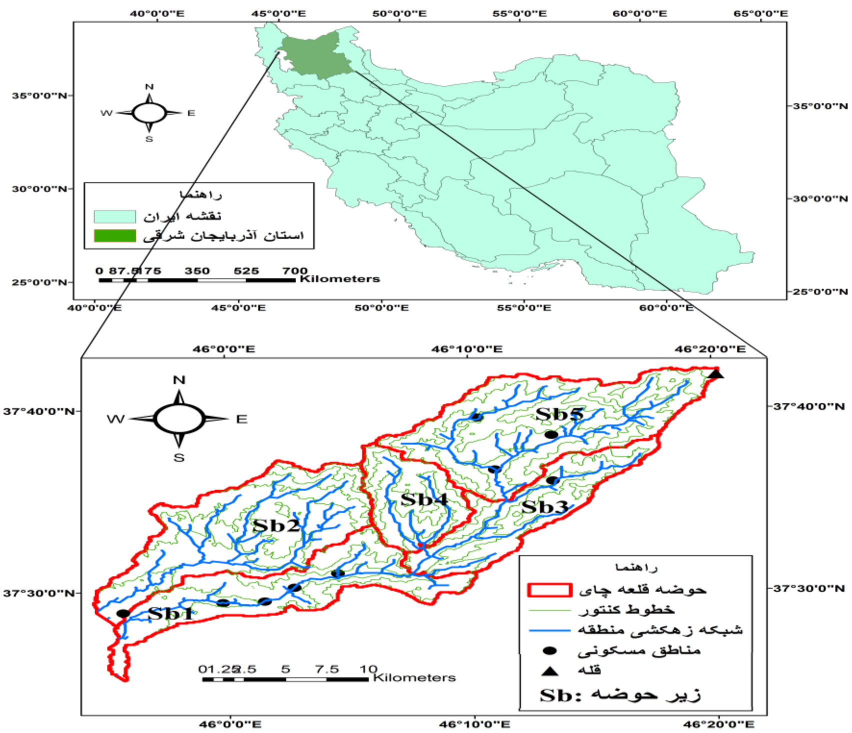
1. Sub Basin

تعیین گردید (بر روی نقشه و در جدول‌ها با علامت اختصاری Sb نشان داده شده است) و هریک از فاکتورهای مدل مورداستفاده برای زیرحوضه‌ها محاسبه شد.

٤. مبانی نظری تحقیق

یکی از مشکلات مطالعات فرسایش و رسوب، کمبود آمار و اطّلاعات موردنیاز است. این مسئله در کشورهای درحال‌توسعه شدیدتر بوده و کشور ما ایران ازجمله کشورهایی است که با این معضل روبه‌رو است. بنابراین به‌دلیل پیچیدگی فرایندها و کمبود آمار مناسب و فقدان ایستگاه‌های اندازه‌گیری و به‌منظور سهولت کار، اغلب مطالعات فرسایش و رسوب کشور با استفاده از روش‌های تجربی انجام می‌گیرد(قضاوتی، ولی، مقامی، عبدی، و شرفی، ۱۳۹۱، ص. ۱۱۸). بنابراین تحلیل و برآورد میزان فرسایش و رسوب و تهیهٔ نقشه‌های شدّت فرسایش، بررسی عوامل ایجاد فرسایش و ارائهٔ راهکارهای مدیریتی، با توجّه به روند فزایندهٔ فرسایش خاک و مساحت وسیع اراضی و گاهی حتّی صعب‌العبور بودن یا عدم دسترسی به منطقه، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانهٔ اطّلاعات جغرافیایی را ضروری می‌نماید (شرستا[1]، ۲۰۰۱، ص. ۲). معادلهٔ جهانی فرسایش خاک RUSLE در سال ۱۹٤۷ ارائه شد و بعداً به‌وسیلهٔ ویشمایر به‌کار گرفته شد و تکامل یافت. در این معادله، بر مجموع انرژی بارندگی برای محاسبهٔ شدّت فرسایش حاصل از انواع فرسایش سطحی و شیاری تأکید شده است (احمدی، ۱۳۸۸، ص. ٥۰٦).

1. Shrestha



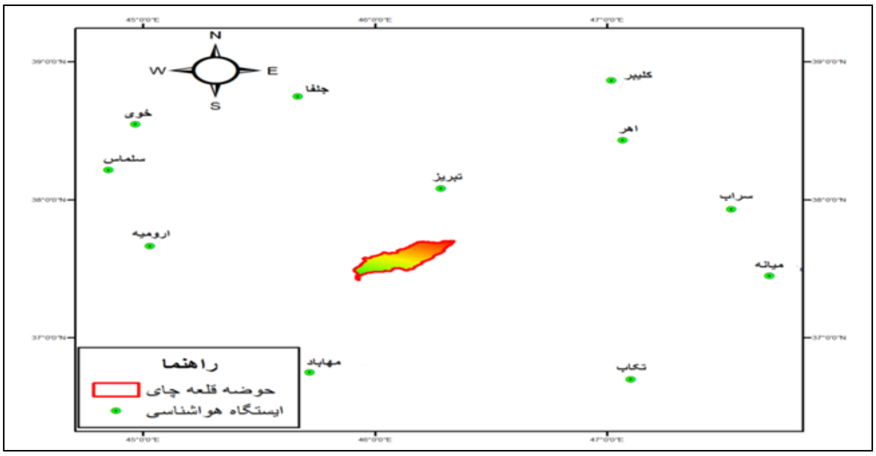
شکل ۱ــ موقعیت حوضهٔ آبریز قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

۵. بحث و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

برای محاسبهٔ فاکتور R (فرسایندگی باران) پس از تعیین ایستگاه‌های اطراف منطقهٔ موردنظر، بارندگی ماهانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها بازسازی شد. شکل (۲) موقعیت ۱۱ ایستگاه مورداستفادهٔ واقع‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. در مرحلهٔ بعد با استفاده از رابطهٔ (۲)، شاخص فورنیر برای ایستگاه‌ها تخمین زده شد. سپس با جای‌گذاری شاخص فورنیر در رابطهٔ (۳) و (٤)، مقدار فاکتور R برای ایستگاه‌ها برآورد شد. مقادیر محاسبه‌شده در جدول (۳) نشان داده شده است. نقشهٔ فاکتور R با روش kriging تهیه و در شکل (٤) نشان داده شده است. مطابق نقشه، مقدار این عامل از ۳/۰۰۳۳٤ تا ۳/۷۰٦٤۵ $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ متغیّر است و نشان می‌دهد فرسایندگی به‌سمت شمال شرقی منطقهٔ موردمطالعه روند کاهشی داشته و در قسمت جنوب غربی بیشتر است. جهت محاسبهٔ فاکتور K اطّلاعات موردنیاز از نقشهٔ ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی (شکل ۳)، لایهٔ خاک‌شناسی منطقه استخراج و پس از آن نقشهٔ

عامل K در GIS آماده‌سازی شد. نتایج حاصل از محاسبهٔ میزان شاخص فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از جدول (١) ارائه گردیده است. متوسّط مقدار K در حوضهٔ موردمطالعه، بین ٠/١ تا ٠/٥ متغیّر است(شکل ٥). برای تهیهٔ نقشهٔ عامل LS با استفاده از DEM منطقه در محیط Arc GIS، در اکستنشن Arc Hydro تحلیل‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی ازجمله طول شیب حوضه محاسبه شد. همچنین درجه و درصد شیب حوضه از روی DEM منطقه (شکل ٦) در قسمت Spatial Analyst به‌دست آمد. نقشهٔ توپوگرافی منطقهٔ موردمطالعه، به‌منظور ایجاد نقشهٔ طول شیب و درجهٔ آن مورداستفاده قرار گرفت. این عامل با استفاده از رابطهٔ (٥) و همچنین استفاده از نقشهٔ طبقات ارتفاعی[1] منطقهٔ موردنظر، نقشهٔ جهت جریان و نقشهٔ جریان تجمّعی تهیه شد که مقدار عامل LS بین ٠ تا ١٠/٣١٩٤ متغیّر است(شکل ٧) و این امر نشان می‌دهد که مقدار عامل در مناطق با شیب تند و ناهموار بیشتر است.



شکل ٢ـ موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤

جدول٣ـ برآورد F و R برای ایستگاه‌های بارندگی

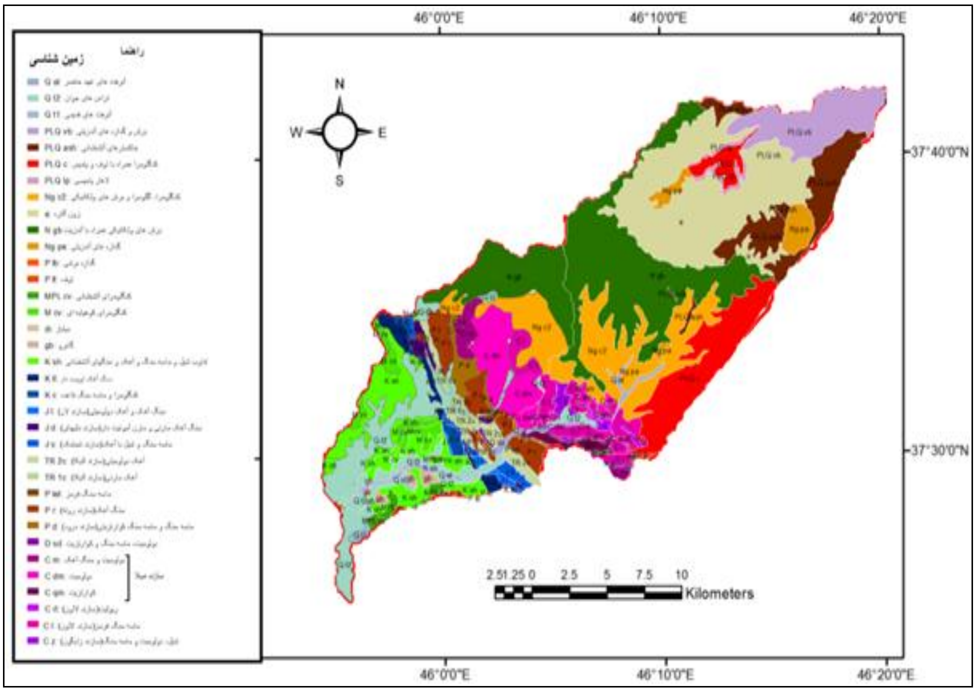
مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	F (شاخص فورنیر)	R (فرسایندگی باران)
سراب	٤٧ ٣٢	٣٧ ٥٦	٤٧٣٢	٢٩/٦	٢/٢٤
میانه	٤٧ ٤٢	٣٧ ٢٧	١١١٠	٣٤/٩	٣/٠٤

1. Digital Elevation Mode (DEM)

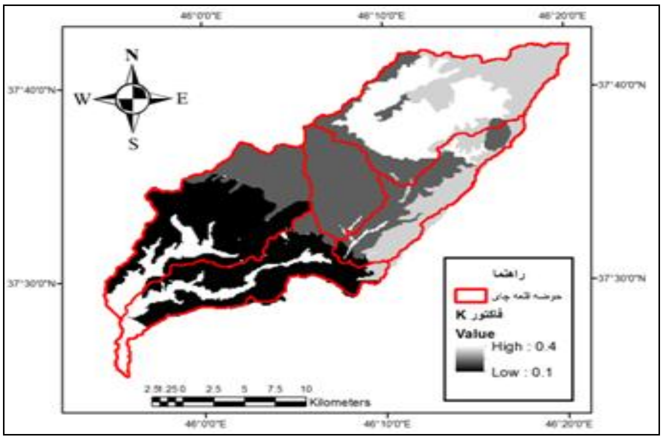
ادامهٔ جدول ٣

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	F (شاخص فورنیر)	R (فرسایندگی باران)
تبریز	٤٦ ١٧	٣٨ ٥	١٣٦١	٣٢/٥٤	٢/٦٧
تکاب	٤٧ ٦	٣٦ ٤٢	١٨١٧/٢	٣٦/٦٥	٣/٣٢
اهر	٤٧ ٤	٣٨ ٢٦	١٣٩٠/٥	٣٠/٨٩	٢/٤٣
جلفا	٤٥ ٤٠	٣٨ ٤٥	٧٣٦/٢	٢٧/٤٤	١/٩
مهاباد	٤٥ ٤٣	٣٦ ٤٥	١٣٥١/٨	٤٧/٤١	٥/٣٥
خوی	٤٤ ٥٨	٣٨ ٣٣	١١٠٣	٣٠/٣٩	٢/٣٥
ارومیه	٤٥ ٣	٣٧ ٤٠	١٣٢٨	٣٤/٠٣	٢/٩
سلماس	٤٤ ٥١	٣٨ ١٣	١٣٣٧	٢٨/٤٩	٢/٠٩
کلیبر	٤٧ ١	٣٨ ٥٢	١١٨٠	٤٥/٥٥	٥



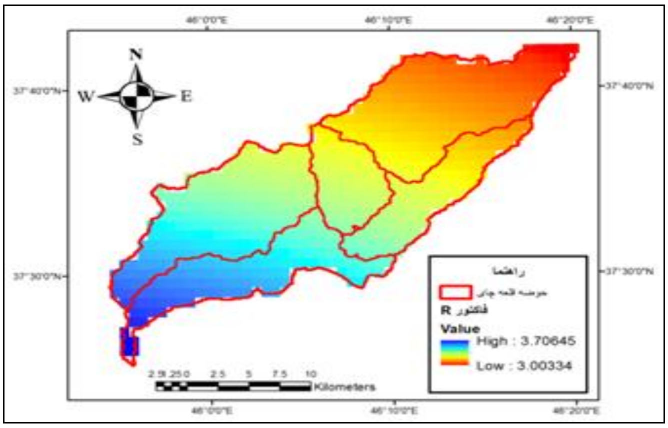
شکل ٣ـ نقشهٔ زمین‌شناسی

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤



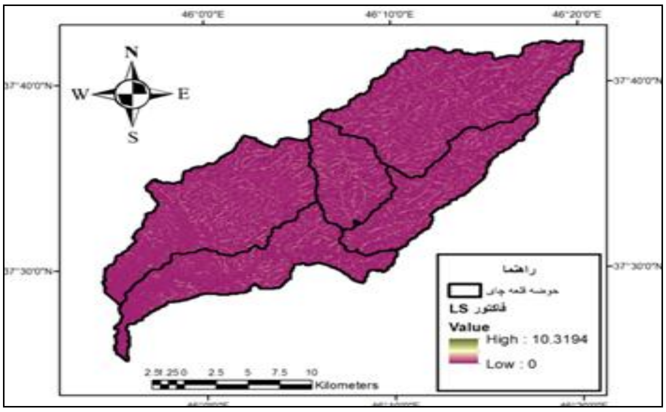
شكل٤ـ نقشهٔ عامل R با روش kriging

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤



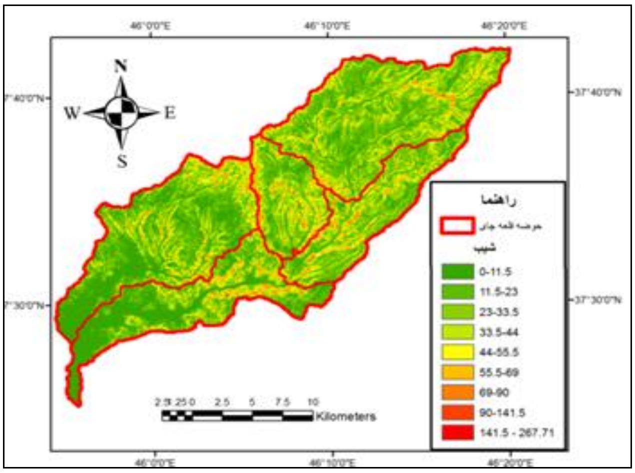
شكل٥ـ نقشهٔ عامل K

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤



شكل٦ـ نقشهٔ شيب حوضهٔ آبريز قلعه‌چاى

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤



شکل ۷ـ نقشهٔ عامل LS

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

برای تهیهٔ نقشهٔ عامل C، از نقشهٔ کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقـه اسـتفاده شـد. بـا استفاده از منابع موجود، طبقه‌بندی کاربری اراضی و پوشش گیاهی انجام پذیرفت که مقدار آن برای حوضهٔ قلعه‌چای بین ۰/۰٤ تا ۰/٤۵ متغیّر است. نقشهٔ عامل C نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این پارامتر، در مناطق بدون پوشش گیاهی است و کمترین مقدار آن، در مناطقی است که پوشش متراکم وجود دارد و در شکل، با رنگ روشن‌تر مشخّص شده است(شکل ۸).

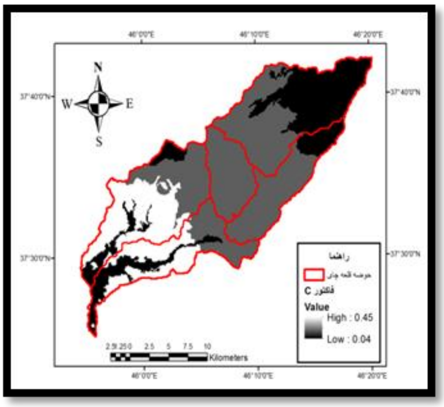
با توجّه به عدم انجام اقدامات حفاظتی مشخّص در منطقـه، مقـدار فـاکتور P یـک درنظـر گرفته شده است.

٦. یافته‌های تحقیق

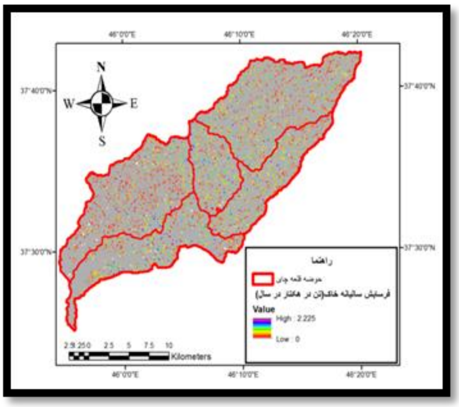
فرسایش متوسّط سالیانهٔ خاک از طریق حاصل‌ضرب عامل فرسـایندگی بـاران (R)، عامـل فرسایش‌پذیری خاک(K)، عامل طول شیب(L) و درجهٔ شیب(S)، عامل پوشش گیـاهی(C) و عامل حفاظت خاک(P) با استفاده از رابطـهٔ (۱) در اکستنشـن Raster calculator در محـیط نرم‌افزار Arc GIS10.2 محاسبه شد. نقشهٔ به‌دست‌آمده از ایـن مـدل، در شـکل ۹ نشـان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در منطقهٔ موردمطالعه بین صفر تـا ۲/۲۲۵ تُـن در هکتـار در سال در سطح پیکسل متغیّر است. متوسّط و انحراف معیار آن بـه‌ترتیـب ۰/۰۲ و ۰/۰٦ تُـن در

هکتار در سال تعیین شد که نشان می‌دهد حوضهٔ موردمطالعه، جزو طبقهٔ فرسایشی خیلی کم تا کم است.

مقادیر فاکتورهای مدل استفاده‌شده در ایـن پـژوهش، مربـوط بـه زیرحوضـه‌هـای منطقـهٔ موردمطالعه، به تفکیک در جدول‌های (٤ـ ۹) آورده شده است.



شکل ۸ـ نقشهٔ عامل C



شکل ۹ـ نقشهٔ فرسایش سالیانهٔ خاک

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

جدول ٤ـ فاکتور R زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4	Sb5	کلّ حوضه
حداقل	۳/۳٦	۳/۲٦	۳/۱۳	۳/۲۲	۳/۰۱	۳
حداکثر	۳/۷۱	۳/٦۱	۳/٤۲	۳/۳۹	۳/۲٦	۳/۷۱
میانگین	۳/۵۰	۳/٤۰	۳/۲۹	۳/۳۰	۳/۱٤	۳/۳۱
انحراف معیار	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰٤	۰/۰٦	۰/۱۵

جدول ۵ـ فاکتور K زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4	Sb5	کلّ حوضه
حداقل	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲٦	۰/۲٦	۰/۳۰	۰/۱۰
حداکثر	۰/۳۷	۰/۳۷	۰/٤۰	۰/۳۷	۰/٤۰	۰/٤۰
میانگین	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۳۰
انحراف معیار	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰٤	۰/۰۹

جدول۶ـ فاکتور C زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4	Sb5	کلّ حوضه
حداقل	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰٤	۰/۰٤
حداکثر	۰/٤٥	۰/٤٥	۰/۱٥	۰/۱٥	۰/۱٥	۰/٤٥
میانگین	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۱٤	۰/۱٥	۰/۱۱	۰/۱٥
انحراف معیار	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۲	۰	۰/۰٤	۰/۰٦

جدول۷ـ فاکتور LS زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4	Sb5	کلّ حوضه
حداقل	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حداکثر	۱۰/۳۲	٦/۰٦	۷/۳۷	۹/۹۲	٥/٥۲	۱۰/۳۲
میانگین	۰/۱۳	۰/۱٤	۰/۱٤	۰/۱۷	۰/۱٤	۰/۱٤
انحراف معیار	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/٤۳	۰/٥۱	۰/٤۱	۰/٤۲

جدول ۸ـ شیب زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4	Sb5	کلّ حوضه
حداقل	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حداکثر	۲٦۱/۹۱	۱٤٥/۹۳	۱۸۱/۰٦	۲٦۷/۷۱	۱۷٤/۰٤	۲٦۷/۷۱
میانگین	۲۰/۷٦	۲۱/٦۸	۲۸/۷۱	۳۱/٤۳	۲٦/۹٦	۲٥/۰٥
انحراف معیار	۱۸/۰۲	۱٦/۱۰	۱٥/۸۰	۱۸/۱۳	۱٤/۰۹	۱٦/٥۳

جدول ۹ـ فرسایش زیرحوضه‌های قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4	Sb5	کلّ حوضه
حداقل	۰	۰	۰	۰	۰	۰
حداکثر	۲/۲۲	۰/٦۸	۰/٥۸	۰/۷۸	۰/٦۸	۰/۲۲٥
میانگین	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲
انحراف معیار	۰/۰۸	۰/۰٦	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰٦	۰/۰٦

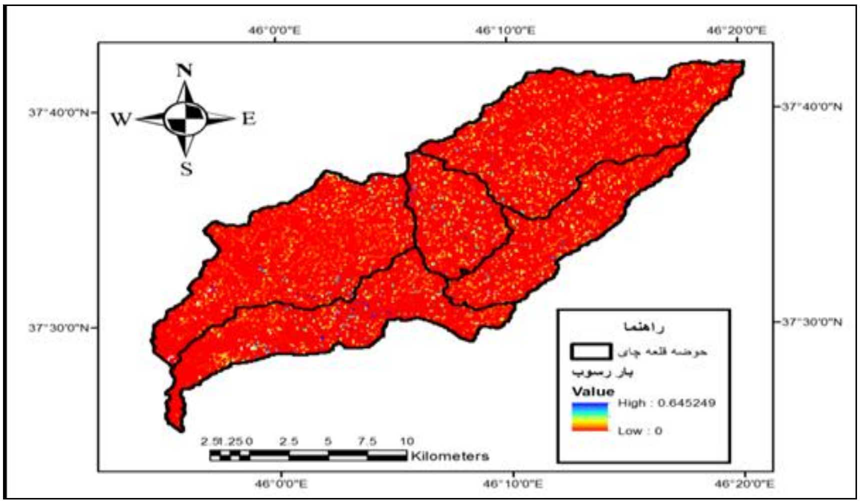
براین‌اساس واحد هیدرولوژیکی Sb1 دارای حداکثر بـار رسـوب و واحـد هیـدرولوژیکی Sb3 دارای حداقل بار رسوب هستند.

در این پژوهش، میزان نسبت تحویل رسوب، بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۹ و حداکثر بـار رسـوب در منطقة موردمطالعه بین ۰/۱۹ تا ۰/٦٤ و رسوب کل بین ۹۱۰۵۰ تا ۳۰۳۳٦۰ متغیّر است (جدول ۱۰). رسوب کلّ به‌دست‌آمده با استفاده از مدل EPM بـا مسـاحت ۲٤۹/۵ کیلـومتر مربّـع در حوضة آبریز موردمطالعـه ۱۳۳۰۱٦/۱ تُـن در سـال اسـت(روسـتایی، رسـولی، و احمـدزاده، ۱۳۸۹). ازآنجایی‌که مقدار رسوب کلّ به‌دست‌آمده با استفاده از مدل USDA تقریباً نزدیک به مقدار رسوب کلّ مدل EPM بود، این روش به‌عنوان روش بهتر برای محاسبة نسـبت تحویـل رسوب انتخاب گردید و نقشة بار رسوب از آن تهیه گردید (شکل ۱۰).

جدول ۱۰ـ روش‌های نسبت تحویل رسوب و بار رسوب حوضة قلعه‌چای

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

روش‌های نسبت تحویل رسوب	میزان نسبت تحویل رسوب	بار رسوب (تُن در هکتار در سال)	رسوب کل (تن در سال)
USDA	۰/۲۹	۰/٦٤	۳۰۳۳٦۰
وانونی	۰/۲۲	۰/٤۹	۲۳۲۲٦۰
بویس	۰/۰۸	۰/۱۹	۹۱۰۵۰



شکل۱۰ـ نقشة بار رسوب

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پدیدهٔ فرسایش خاک و تولید رسوب برای جامعهٔ بشری مشکلات زیادی را به‌وجود آورده است؛ به‌طوری‌که امروز فرسایش خاک یکی از جدّی‌ترین مشکلات کشورهای درحال‌توسعه و بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته به‌شمار می‌آید. برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی فرسایش ناشی از اعمال مدیریت نادرست در استفاده از اراضی، نیاز به اتّخاذ تدابیری در مقیاس‌های مزرعه و حوضهٔ آبخیز است. در این پژوهش به بررسی فرسایش خاک حوضهٔ آبریز قلعه‌چای با استفاده از مدل RUSLE در محیط GIS پرداخته شده است. حوضهٔ آبریز قلعه‌چای دارای توپوگرافی متغیّری است که با گسترهٔ صفر تا ۱۰/۳۲ عامل LS مشخّص است. بررسی نقشهٔ فاکتور فرسایندگی باران در سطح حوضه نشان داد مقدار این عامل از ۳ تا ۳/۷۱ $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ متغیّر است که نشان می‌دهد فرسایندگی به‌سمت شمال‌شرقی منطقهٔ موردمطالعه روند کاهشی داشته و در قسمت جنوب‌غربی بیشتر است. برای تهیهٔ نقشهٔ عامل C از نقشهٔ کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه استفاده شد. مقادیر این فاکتور از ۰/۰٤ تا ۰/٤٥ متغیّر است که بیانگر پوشش گیاهی نسبتاً خوب حوضه می‌باشد. جهت محاسبهٔ فاکتور K، اطّلاعات موردنیاز از نقشهٔ ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی، لایهٔ خاک‌شناسی استفاده شد و متوسّط مقدار K در حوضهٔ مورد مطالعه بین ۰/۱ تا ۰/۵ متغیّر است.

درنهایت نقشه‌های موردنظر در محیط GIS تهیه و با هم تلفیق شدند. بررسی نقشهٔ خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد که میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه برحسب تُن در هکتار، در سال از صفر تا ۲/۲۲۵ متغیّر است. مطابق با این نقشه، حوضهٔ موردمطالعه، جزو طبقهٔ فرسایشی خیلی کم تا کم قرار دارد. نتایج محاسبات روش‌های نسبتِ تحویل رسوب نشان می‌دهد میزان نسبت تحویل رسوب بین ۰/۰۸ تا ۰/۲۹ و حداکثر بار رسوب در منطقهٔ موردمطالعه، بین ۰/۱۹ تا ۰/٦٤ تُن در هکتار، در سال متغیّر است. مقایسهٔ رسوب کلّ برآوردشده در روش USDA با مقدار به‌دست‌آمده از روش EPM برگرفته از پژوهش روستایی، رسولی، و احمدزاده(۱۳۸۹)، قابلیت تلفیق مدل RUSLE و GIS را در برآورد میزان فرسایش و بار رسوب نشان می‌دهد.

کتابنامه

۱. آرخی، ص؛ نیازی، ی. (۱۳۸۹). بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ بالادست سدّ ایلام). *مجلّهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۷* (۲)، ۱ـ۲۷.

۲. احمدی، ح. (۱۳۸۸). *ژئومورفولوژی کاربردی*. چاپ ششم. انتشارات دانشگاه تهران.

۳. خیّام، م؛ غنمی جابر، م؛ و صمدزاده، رسول. (۱۳۹۲). مقایسهٔ کارایی مدل های MPSIAC و EPM در برآورد فرسایش و رسوب زایی حوضهٔ آبخیز سقزچی چای نمین. *دو فصلنامهٔ ژئومورفولوژی کاربردی ایران، ۱* (۱)، ۱ـ۱۳.

۴. رحیمی، خ؛ مزبانی، م. (۱۳۹۲). ارزیابی تغییرات فرسایش حوزهٔ آبخیز سیوند طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ با استفاده از مدل RUSLE. *فصلنامهٔ پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۳(۹)، ۱ـ۱۸.

۵. رخبین، م.؛ نوحه‌گر، ا.؛ کمالی، ع.؛ و حبیب‌اللهیان، م. (۱۳۹۳). برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب در حوضهٔ آبخیز لاورفین (استان هرمزگان) با استفاده از سنجش از دور (RS)، سیستم اطّلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل تجربی (RUSLE)، *فصلنامهٔ تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹ (۳)، ۸۹ـ۱۰٤.

۶. رضائی، پ؛ فریدی، پ؛ قربانی، م؛ و کاظمی، م. (۱۳۹۳). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثّرترین عامل آن در حوضهٔ آبخیز گابریک ـ جنوب خاوری استان هرمزگان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۳(۱)، ۹۷ـ۱۱۳.

۷. روستایی، شهرام؛ رسولی، ع. ا.؛ و احمدزاده، ح. (۱۳۸۹). مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضهٔ آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS. *جغرافیا و توسعه. ۸*(۱۸)، ۱۵۹ـ۱۷۸.

۸. زندی، ج.؛ سلیمانی، ک.؛ و حبیب‌نژاد روشن، م. (۱۳۹۲). اولویت‌بندی نواحی کنترل فرسایش خاک با استفاده از تکنیک‌های ارزیابی چندمعیاره و GIS. *جغرافیا و توسعه، ۱۱* (۳۱)، ۹۳ـ۱۰٦.

۹. شکوری، ب. (۱۳۷٤). فرسایش خاک و پیامدهای آن در اکوسیستم. *مجلّهٔ آب، خاک و ماشین*، 6 (۲)، ٥٥ ـ ٦٤.

۱۰. صالحی، م.؛ اسفندیارپور بروجنی، ع.؛ مهاجر، ر.؛ و باقری بداغ‌آبادی، م. (۱۳۹٤). *حفاظت آب و خاک تکمیلی*. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه پیام نور.

۱۱. قضاوتی، ر.؛ ولی، ع.؛ مقامی، ی.؛ عبدی، ژ.؛ و شرفی، س. (۱۳۹۱). مقایسهٔ مدل‌های PSIAC EPM, MPSIAC در برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از GIS . *جغرافیا و توسعه، ۱۰* (۲۷)، ۱۱۷ـ۱۲٦.

۱۲. واعظی، ع.؛ بهرامی، ح.؛ صادقی، ح. ر.؛ و مهدیان، م. ح. (۱۳۸۹). برآورد عامل فرسایش‌پذیری K با استفاده از مدل RUSLE در بخشی از خاک‌های ناحیهٔ نیمه‌خشک در شمال‌غربی ایران. *مجلّهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۷*(۱۳). ۱۰۵ـ ۱۲٤.

13.Bonilla, C., José, A., Reyes, L., & Magri, A. (2010). Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, central chile. *Chilean Journal of Agricultural Research, 70*(1), 159-169.

14.Carvalho, D. F. D., Durigon, V. L., Antunes, M. A. H., Almeida, W. S. D., & Oliveira, P. T. S. D. (2014). Predicting soil erosion using Rusle and NDVI time series from TM Landsat 5. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *49*(3), 215-224.

15.Farhan, Y., Dalal, Z., & Farhan, I. (2013). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE approach, RS, and GIS techniques: A case study of Kufranja watershed, northern Jordan. *Journal of Water Resource and Protection, 5*(12), 1247-1261.

16.Haan, C.T., Barfield, B.J., & Hayes, J.C. (1994). *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. San Diego: Academic Press.

17.Li, H., Xiaoling, H., Lim, K. J., & Sagong, M. (2010). Assessment of soil erosion and sediment yield in Liao watershed, Jiangxi Province, China, Using USLE, GIS, and RS. *Journal of Earth Science*, *21*(6), 941–95.

18.Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., & Kim, K. S. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *Catena*, *64*(1), 61-80.

19.Marker, M. (2006). Assessment of land degradation susceptibility by scenario analysis: a case study in Southern Tuscany, Italy. *Geomorphology, 93*(1-2), 120-129.

20.Renard, K. G., & Freidmund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, *Journal of Hydrology*, *157*(1-4), 287-306.

21.Shrestha, D. (2001). *Soil erosion modeling using remote sensing and GIS: A case study of Jhikhu Khola watershed, Nepal* (Unpublished master's thesis). Andhra University, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India.

22.Tiwari, A.K., Riss, L.M., & Nearing, M.A. (2000). Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *American Society of Agriculture Engineers*, *43*(5), 1129-1135.

23.Wang, G., Gertner, G., Fang, S., & Anderson, A.B. (2003). Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with TM images and a slope map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69*(8), 889-898.

24.Wischmeier, W.H., & Smith, D.D.(1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook. No. 537. Washington DC: US Department of Agriculture.